
 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN DEL AUTOMÓVIL
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE PROFESIONALES DE AUTOMOCIÓN 

Sistemas de posicionamiento

Felipe Jiménez Alonso
Catedrático de Universidad
Director de la Unidad de Sistemas Inteligentes en Vehículos
Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA)
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
e mail: felipe.jimenez@upm.es

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS (Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte) Felipe Jiménez Alonso

1

Técnicas de Posicionamiento

Posicionamiento por Satélite GNSS
Sistemas inerciales INS
Sistemas de percepción

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS (Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte) Felipe Jiménez Alonso

2

Posicionamiento por satélite

- Dentro de los grupos de Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), destacan:
 - NAVSTAR - GPS
 - GLONASS
 - GALILEO
- Posicionar un objeto en la superficie de la Tierra a través de las señales emitidas en forma de ondas de radio por los satélites de dichas constelaciones, que dicho objeto procesaba en la superficie.

Posicionamiento por satélite

- Durante los experimentos desarrollados para determinar con precisión la órbita del satélite artificial Sputnik-1 en 1957, surgió la idea del primer sistema de navegación por satélite que recibió el nombre de TRANSIT. Se consideró entonces la posibilidad de abordar el problema inverso.
- El Departamento de Defensa de EEUU, a la vista de los resultados satisfactorios del sistema TRANSIT, empezó a trabajar en la línea de obtener sistemas más avanzados. De estos estudios surgió el programa NAVSTAR-GPS, el cual proporciona precisiones muy altas en la localización sobre la superficie terrestre.

Posicionamiento por satélite

- Los sistemas de navegación por satélite tienen como ventajas, entre otras, las siguientes:
 - La información es independiente de las condiciones meteorológicas
 - La cobertura abarca toda la superficie terrestre
 - El tiempo requerido para obtener precisiones altas en la localización es reducido
- Como inconveniente principal está el elevado coste del sistema que incluye los satélites, las estaciones de seguimiento y los receptores.

Posicionamiento por satélite

CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA

- Segmento espacial
- Segmento de control
- Segmento de usuario

Posicionamiento por satélite

CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA

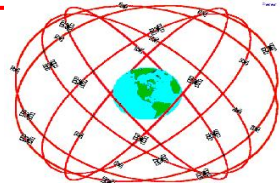
- Segmento espacial

GNSS funciona mediante una red de satélites que se encuentran orbitando alrededor de la tierra:

Sistema de satélites formado por 21 unidades operativas y 3 de repuesto.

Trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie del globo y que se abastecen de energía solar.

Las estaciones terrestres envían información de control a los satélites para controlar las órbitas y realizar el mantenimiento de toda la constelación.



Posicionamiento por satélite

CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA

- Segmento espacial

GPS - NAVSTAR

- La constelación NAVSTAR está formada por seis planos orbitales.
- En cada uno de ellos existe una órbita elíptica casi circular donde se alojan los satélites regularmente distribuidos.
- Los planos tienen una inclinación de 55° respecto al plano del ecuador.
- Cada órbita contiene al menos cuatro satélites, aunque pueden contener más.
- Los satélites se sitúan a una distancia de 20200 Km respecto del geocentro, y completan una órbita en doce horas sidéreas.

Posicionamiento por satélite

CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA

- Segmento espacial

GLONASS

- La Sistema Global de Navegación por Satélite desarrollado por Rusia y que representa la contrapartida al GPS norteamericano y al futuro Galileo europeo.
- Situados en tres planos orbitales con 8 satélites cada uno
- Siguiendo una órbita inclinada de 64,8°.
- Radio de 25510 kilómetros.
- Tarda aproximadamente 11 horas y 15 minutos en completar una órbita.
- Receptores que permiten recibir señales pertenecientes a los dos sistemas GLONASS y GPS: hace interesante las posibilidades de GLONASS en la medición como apoyo al GPS norteamericano.

Posicionamiento por satélite

CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA

- Segmento de control

En este subsistema se encuentran comprendidas las estaciones de seguimiento y control. Su localización es conocida con gran precisión.

La estación principal del sistemas NAVSTAR-GPS está situada en Colorado Springs y existen otras 4 estaciones monitoras uniformemente espaciadas en longitud.

Estas estaciones monitoras reciben la información de los satélites visibles y pueden calcular sus órbitas con gran precisión.

Posicionamiento por satélite

CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA

- Segmento de control

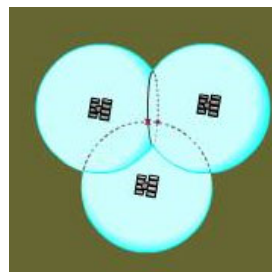
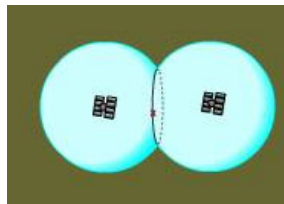


Posicionamiento por satélite

Principio de funcionamiento del sistema de posicionamiento

La técnica de medida de retardos temporales es la única que permite trabajar en tiempo real, de manera que será la técnica empleada en aplicaciones de alta dinámica.

$$(X_i - U_x)^2 + (Y_i - U_y)^2 + (Z_i - U_z)^2 = (R_i - \varepsilon)^2$$



Posicionamiento por satélite

FUENTES DE ERROR

Error = UERE x DOP

- UERE se supone igual para todos los satélites y se define como un vector sobre la línea vista entre el satélite y el usuario, resultado de proyectar sobre ella todos los errores del sistema, los cuales se consideran gaussianos e independientes entre sí
- DOP (dilution of precision) es un término dependiente de la geometría de los satélites en el momento de la adquisición

Posicionamiento por satélite

FUENTES DE ERROR

- Errores en la determinación de la posición de los satélites
- Errores de los relojes de los satélites y receptores
- Error en la propagación de las señales
- Pérdidas de ciclos
- Efecto multipath
- Disponibilidad selectiva

- Dilución de precisión

Posicionamiento por satélite

MODOS DE POSICIONAMIENTO

MODO ABSOLUTO

El posicionamiento absoluto se realiza con un único receptor.

Es necesario que sean visibles 4 satélites, lo que está garantizado con la disposición de la constelación de satélites NAVSTAR.

Inconvenientes desde el punto de vista de la precisión que hacen que su uso no sea adecuado para numerosas aplicaciones.

Esta falta de precisión se debe a la imposibilidad de compensar errores como los producidos en la transmisión de la señal o a causa de la disponibilidad selectiva.

Posicionamiento por satélite

MODOS DE POSICIONAMIENTO

MODO DIFERENCIAL

Se basa en el hecho de que gran parte de los errores están fuertemente correlacionados en receptores próximos

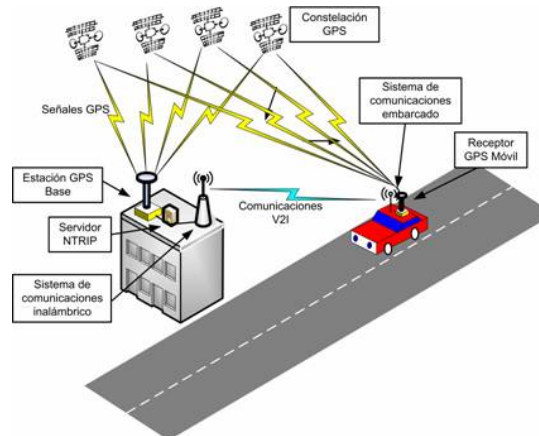
- Una estación base en tierra, con coordenadas muy bien definidas, escucha los satélites GPS.
- Calcula su posición por los datos recibidos de los satélites.
- Dado que su posición está bien definida, calcula el error entre su posición verdadera y la calculada, estimando el error en cada satélite.
- Se envía estas correcciones al receptor a través por un canal de datos.

Se logra una gran mejora en la precisión

Posicionamiento por satélite

MODOS DE POSICIONAMIENTO

MODO DIFERENCIAL



Posicionamiento por satélite

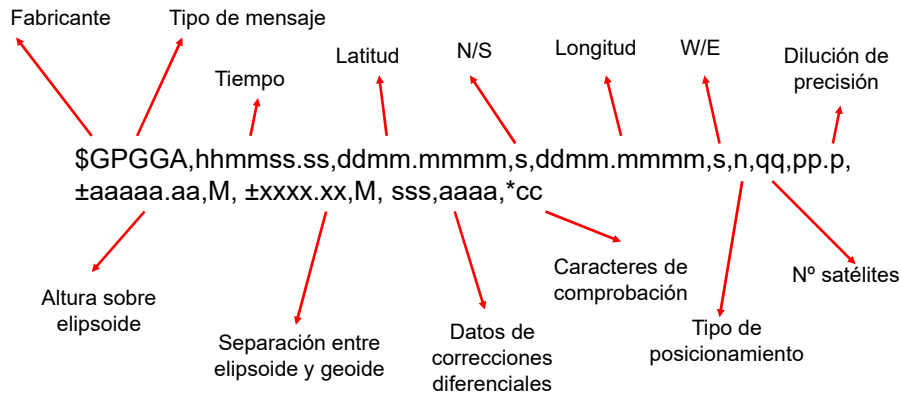
MODOS DE POSICIONAMIENTO

Tipo de posicionamiento	Error
Tipo 1 (absoluto)	< 15 m
Tipo 5	< 1 m
Tipo 4	1 cm

Posicionamiento por satélite

INFORMACIÓN RECIBIDA

Lenguaje en formato NMEA 0183 Standars Version 2.2. (desarrollado por The Nacional Marine Electronics Association)



Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

19

Posicionamiento por satélite

TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS

- Geoide a la superficie teórica de la Tierra que comprende aquellos puntos que tienen igual gravedad. Debido a las distribuciones locales de masas, la distancia al centro de la Tierra no es la misma en todos los puntos del geoide.
- El elipsoide es la representación de un modelo matemático que se asemeja al geoide de manera que sí está definido geoméricamente, pero no físicamente
- Sistemas cartesianos
ECEF (Earth Centered, Earth Fixed).
Plano XY se toma el plano ecuatorial
Eje X apunta a una posición fija de la esfera celeste
Eje Z es normal al plano XY y en la dirección del polo norte
Eje Y forma un triedro a derechas

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

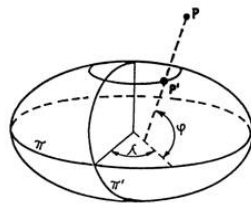
20

Posicionamiento por satélite

- Sistema elipsoidal

La posición de un punto P quedará definida por medio de 3 parámetros:

- Latitud (φ): ángulo que forma la normal al elipsoide desde el punto con el plano del Ecuador
- Longitud (λ): ángulo que forma el meridiano que pasa por el punto proyección normal del punto P sobre el elipsoide con el meridiano de referencia medido en sentido dextrógiro
- Altitud (h): Distancia según la normal de P al elipsoide



Posicionamiento por satélite

- Sistema WGS 84

- El origen es el centro de masas de la tierra
- El eje Z es paralelo a la dirección del polo medio definido por el Bureau International de l'Heure
- El eje X está definido por la intersección del meridiano origen (Greenwich) y el plano del ecuador medio
- El eje Y es ortogonal con los anteriores formando un triedro a derechas

- Sistema Geodésico ED50

- Para realizar los cálculos de las triangulaciones en planimetría y los cálculos de las redes de nivelación de alta precisión, se han definido otros sistemas de referencia basados en un elipsoide de referencia, un punto fundamental y orígenes de longitudes y altitudes.

Posicionamiento por satélite

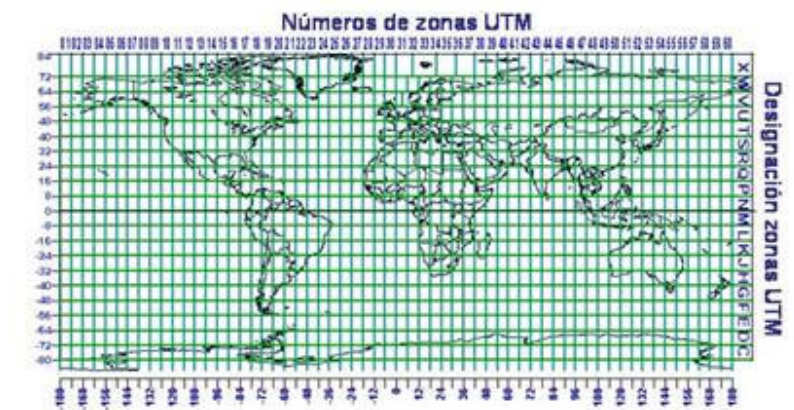
- La superficie de la Tierra puede considerarse como **alabeada** (no desarrollable). Hay necesidad de trabajar sobre diagramas en 2 dimensiones.
- En una **transformación conforme**, la superficie elipsoidal pasa a estar representada sobre un plano con la particularidad de que se conservan los ángulos.
- El modelo de Mercator, que da lugar a las **coordenadas UTM**, usa transformación conforme.
- La superficie de la Tierra está dividida en 60 zonas de Este a Oeste y en 20 bandas de Norte a Sur denotadas por las letras C a X. La separación de las bandas es de 8° , exceptuando la banda X (banda más al Norte) que comprende 12° .
- Las zonas UTM tienen como límites dos meridianos separados 6° .
- El origen de la zona UTM se toma, por convenio, como el punto de corte del meridiano central y el ecuador.

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

23

Posicionamiento por satélite



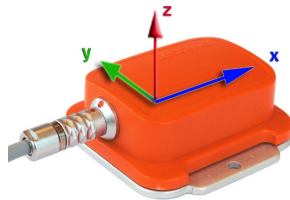
Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

24

Posicionamiento con INS

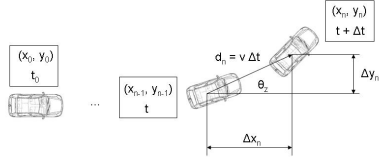
Sistemas inerciales vs. GNSS



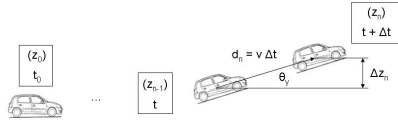
Posicionamiento con INS

	Sistemas inerciales de medida (velocidad, giróscopo)	Sistemas globales de posicionamiento
Precisión	Dependiente del equipamiento. Error acumulativo debido a la integración de las variables medidas (dependiente de la distancia recorrida)	Nivel de precisión dependiente del funcionamiento absoluto o diferencial (errores de hasta 1 o 2 decenas de metros)
Robustez	Señal sin discontinuidades	Pérdidas y deterioros de la señal en túneles, zonas urbanas, etc que conducen a discontinuidades en los resultados
Referencia	No dispone de una referencia absoluta, que se debe introducir externamente	Proporciona una referencia absoluta
Tipo de información	Permite obtener la geometría de la carretera completa en planta y alzado	Permite la obtención de coordenadas del trazado en planta y alzado, a excepción del peralte

Posicionamiento con INS



Cálculo de coordenadas del trazado en planta



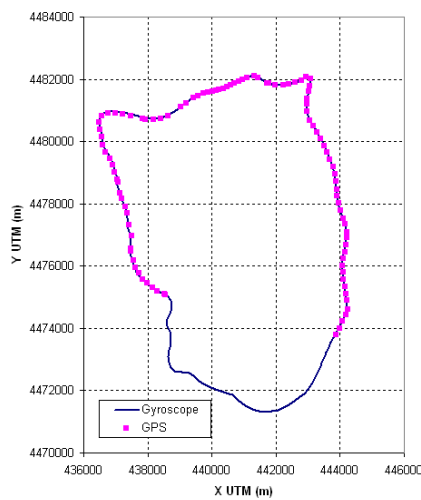
Cálculo de coordenadas del trazado en alzado

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x_n = x_{n-1} + v_n \cdot \Delta t_n \cdot \cos(\theta_{zn}) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta t_i \cdot \cos(\theta_{zi})$$

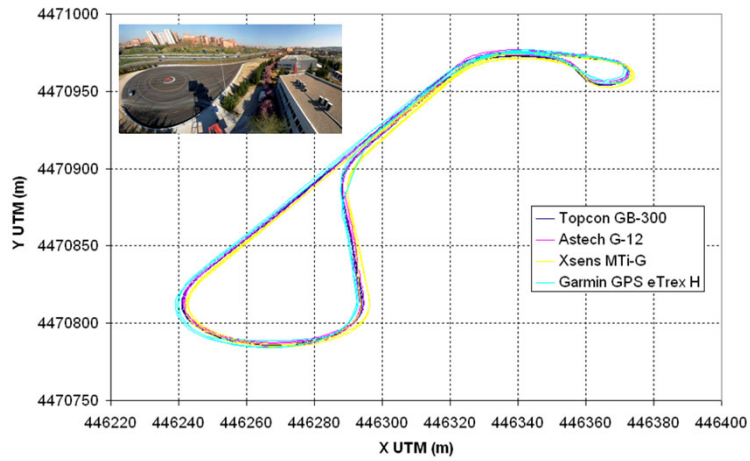
$$y_n = y_{n-1} + \Delta y_n = y_{n-1} + v_n \cdot \Delta t_n \cdot \sin(\theta_{zn}) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta t_i \cdot \sin(\theta_{zi})$$

$$z_n = z_{n-1} + \Delta z_n = z_{n-1} + v_n \cdot \Delta t_n \cdot \sin(\theta_{yn}) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta t_i \cdot \sin(\theta_{yi})$$

Posicionamiento con INS



Posicionamiento con INS

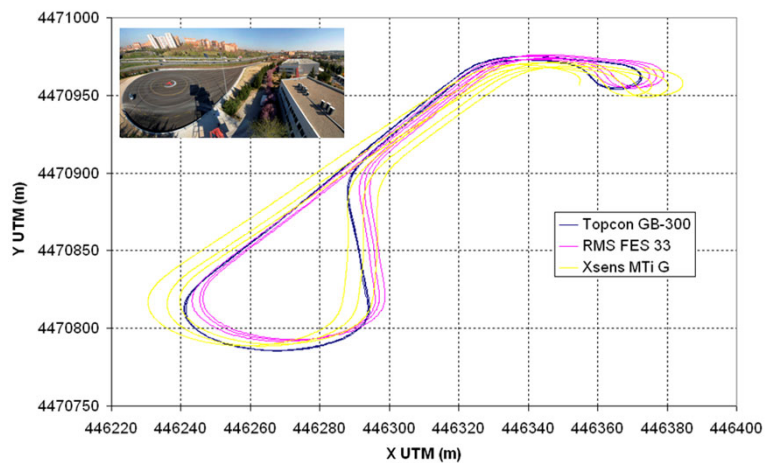


Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

29

Posicionamiento con INS



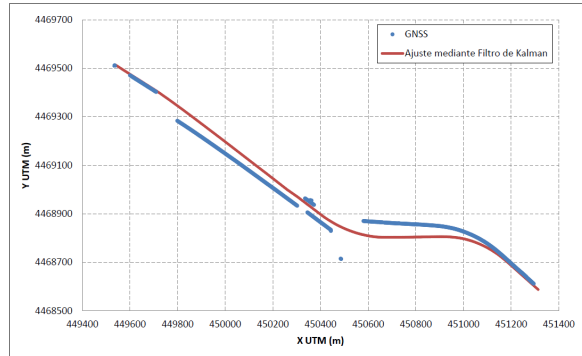
Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

30

Posicionamiento con INS

Combinación de señales mediante Filtro de Kalman



Posicionamiento con sistemas de percepción

Complementario a posicionamiento con GPS + INS

- Para mayor precisión (**where in the lane**)
- En zonas sin posicionamiento absoluto
- Soporte a posicionamiento relativo

Tradicionalmente con visión artificial y/o LIDAR

Búsqueda de elementos de referencia:

- Líneas de la carretera
- Bordos de calzada (bordillos)
- Elementos fijos conocidos georeferenciados

SLAM

Mapas electrónicos

Mapas electrónicos
Map-matching

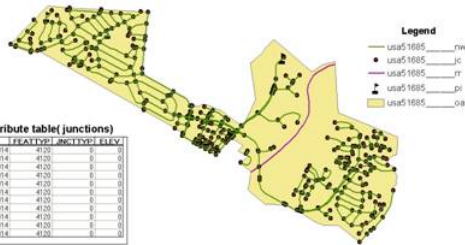
Mapas electrónicos

Un **Sistema de Información Geográfica** (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada.

El SIG funciona como una **base de datos** con información geográfica que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

Mapas electrónicos

Sample Tele Atlas Inc. network shapefiles: Manassas Park City, Virginia



Portion of "usa51685_jc.shp" attribute table (junctions)

FID	Shape	NO	FEATTYPE	ACTTYPE	ELEV
0 Point	8.485100e-014	4120	0	0	0
1 Point	8.485100e-014	4120	0	0	0
2 Point	8.485100e-014	4120	0	0	0
3 Point	8.485100e-014	4120	0	0	0
4 Point	8.485100e-014	4120	0	0	0
5 Point	8.485100e-014	4120	0	0	0
6 Point	8.485100e-014	4120	0	0	0
7 Point	8.485100e-014	4120	0	0	0
8 Point	8.485100e-014	4120	0	0	0
9 Point	8.485100e-014	4120	0	0	0
10 Point	8.485100e-014	4120	0	0	0

Portion of "usa51685_rw.shp" attribute table (roads or edges)

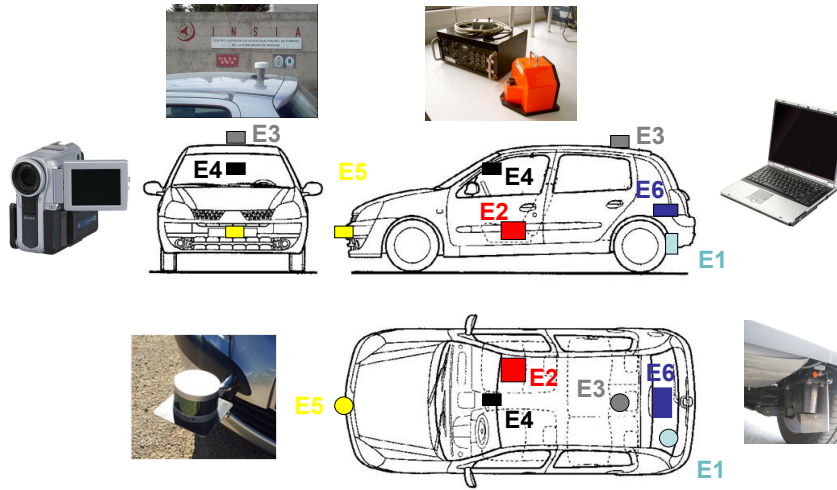
FEATTYPE	FID	ACTNO	FEACTTYPE	ACTNO	ACTTYPE	MEASUR	FREQ	NETCLASS	NETZCLASS	NAME	NAMELC	SDR	BUMP
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	191	5	0	3 OLD CENTREVILLE RD	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	361	5	0	2 MANASSAS DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	253	7	0	7 PHILLES RUN/POW	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	167	4	0	5 SPANNGRAM DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	64	7	0	5 SPANNGRAM DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	139	7	0	5 SPANNGRAM DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	214	7	0	5 SPANNGRAM DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	108	4	0	3 HELLWOOD AVE	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	308	4	0	3 OLD CENTREVILLE RD	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	495	3	0	3 OLD CENTREVILLE RD	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	372	5	0	4 EULOU AVE	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	842	8	0	4 CONNER DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	139	4	0	3 MANASSAS DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	55	8	0	4 EULOU AVE	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	139	4	0	3 MANASSAS DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	11	8	0	3 MANASSAS DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	46	5	0	4 EULOU AVE	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	281	4	0	3 MANASSAS DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	162	4	0	3 MANASSAS DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	187	4	0	4 CONNER DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	8	6	0	3 MANASSAS DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	72	5	0	4 CONNER DR	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	60	4	0	4 EULOU AVE	ENR5	0	0
4110	0	8.485100e-014	0	8.485100e-014	0	0	8	4	0	3 OLD CENTREVILLE RD	ENR5	0	0

Mapas electrónicos

GENERACIÓN DE MAPAS ELECTRÓNICOS

- Digitalización de mapas convencionales
- Fotografías aéreas
- Vehículo instrumentado
 - Sistemas inerciales
 - Posicionamiento por satélite
 - Sistemas de percepción

Mapas electrónicos



Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

39

Map-matching

El proceso de posicionamiento puede dar lugar a errores e incertidumbres de medición.

Estos errores provienen principalmente de dos fuentes:

- los errores y simplificaciones de los mapas digitales
- los errores en la localización del vehículo

A partir de estos datos inexactos, los algoritmos de map-matching buscan asignar la ubicación del vehículo a un segmento en el mapa digital en cada instante.

Estos algoritmos se han desarrollado para satisfacer esa necesidad y tratar de enmendar estos errores para ofrecer un posicionamiento más preciso.

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

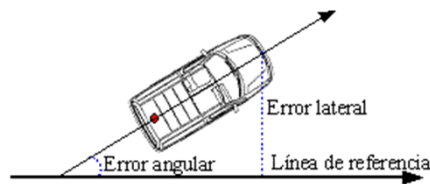
Felipe Jiménez Alonso

40

Map-matching

Método de **map-matching** que nos interesa tener en cuenta, es aquel donde se emplea la información generada por un receptor GPS y comparada con mapas GPS de carreteras que contienen la trayectoria de la ruta que se desea llevar a cabo.

- Error Lateral: es la distancia de un punto determinado del vehículo a la línea de referencia.
- Error Angular: es el ángulo que forma el vector director del coche con respecto a la línea de referencia.



Map-matching

CLASIFICACIÓN DE ALGORITMOS:

- Algoritmos geométricos (point-to-point matching, point-to-curve matching, curve-to-curve matching).
- Algoritmos topológicos: usan relaciones entre entidades como cercanía, conectividad, etc.
- Algoritmos probabilísticos: indican un nivel de confianza en el posicionamiento
- Herramientas avanzadas: Filtro de Kalman, Lógica difusa, filtros de partículas, inferencia Bayesiana, etc.

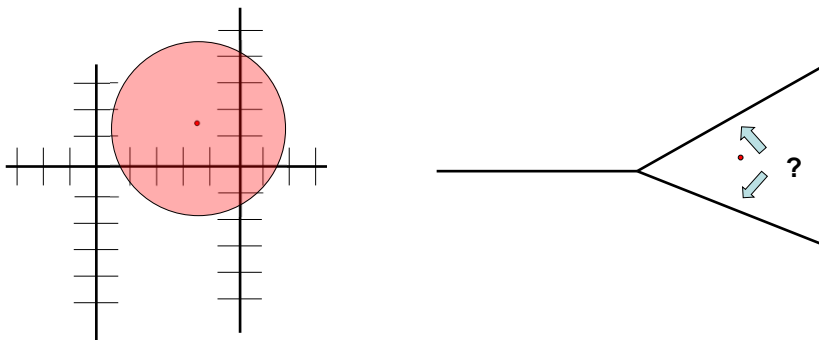
Se debe buscar compromiso entre precisión y tiempo de cálculo

Map-matching

EJEMPLO DE ALGORITMO

1. Definición de los segmentos candidatos
2. Selección preliminar de segmento: parámetros topológicos e históricos y cálculo del peso final de los segmentos
3. Selección definitiva de segmento + Corrección del impacto del parámetro de pertenencia + corrección de cambio de segmento apropiado
4. Posicionamiento del vehículo en el mapa digital

Map-matching



Map-matching

Parameters

$$W_{d2} = K_d \cdot \left[1 - \frac{\tilde{d}(GNSS, link\ k)}{R} \right] \quad (1)$$

$$W_d = K_{d2} \cdot \left[1 - \frac{d(GNSS, link\ k)}{R} \right] \quad (2)$$

$$W_a = K_a \cdot |\cos \alpha_k| \quad (3)$$

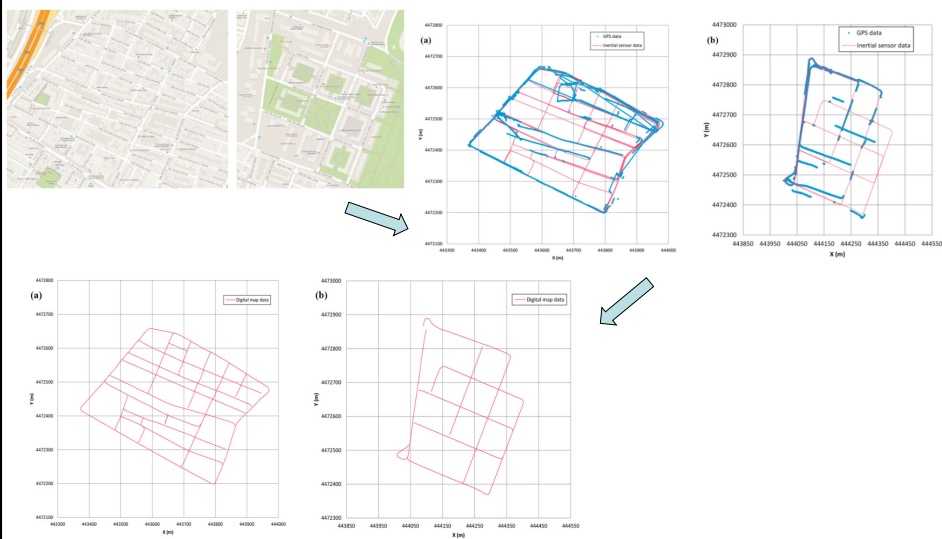
$$W_b = K_b \cdot \beta_k \quad (4)$$

$$W_p = \begin{cases} K_p & \text{if the condition is satisfied} \\ 0 & \text{if the condition is not satisfied} \end{cases} \quad (5)$$

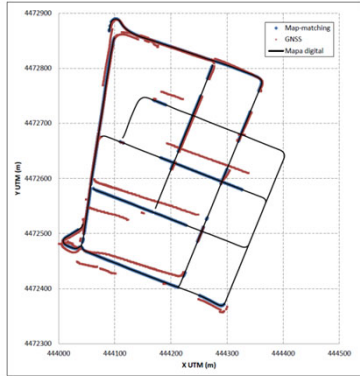
Segment s Final Weight

$$W_{T,s} = \frac{\sum_{k=1}^{n_s} (W_{a,k} + W_{b,k} + W_{d,k} + W_{d2,k})}{n_s} + W_{p,k} \quad (6)$$

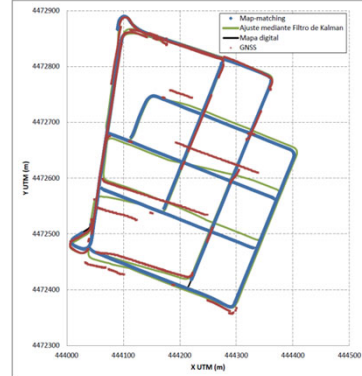
Map-matching



Map-matching



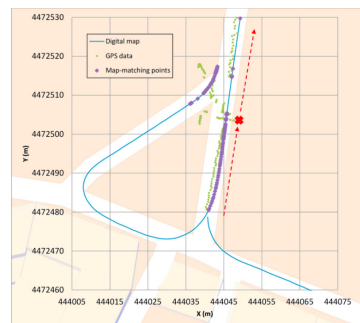
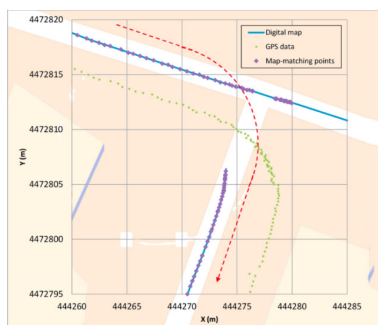
Map-matching usando sólo el receptor GNSS



Map-matching implementando FK.

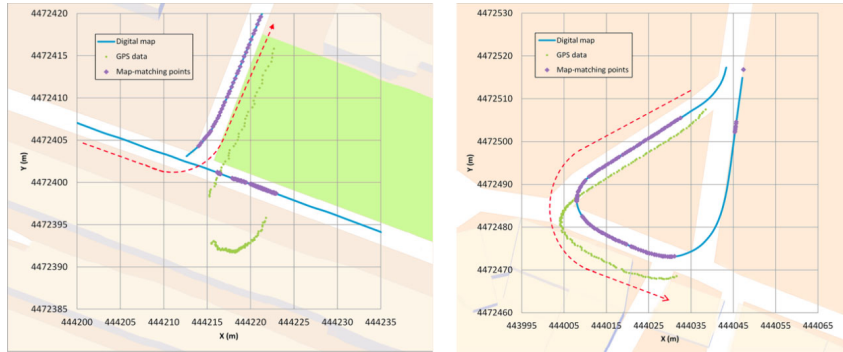
Map-matching

Ejemplos de errores en posicionamiento



Map-matching

Ejemplos de errores en posicionamiento



Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

49

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN DEL AUTOMÓVIL
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE PROFESIONALES DE AUTOMOCIÓN

Sistemas de posicionamiento

Felipe Jiménez Alonso

Catedrático de Universidad
Director de la Unidad de Sistemas Inteligentes en Vehículos
Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA)
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
e mail: felipe.jimenez@upm.es

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

50